

UNIVERSITATEA DIN
PETROȘANI

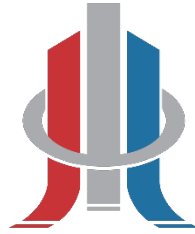
ȘCOALA DOCTORALĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

Coordonator:
Prof. Habil. Dr. Ing. Monica LEBA

Doctorand:
DI (FH) Michael Windisch, MA

Petroșani
2024



UNIVERSITATEA DIN
PETROȘANI

ȘCOALA DOCTORALĂ

Contribuții privind aplicarea în industrie a tehnologiei LiFi

Coordonator:
Prof. Habil. Dr. Ing. Monica LEBA

Doctorand:
DI (FH) Michael Windisch, MA

Petroșani
2024

Rezumat

În ultima perioadă, traficul de date mobile a crescut semnificativ la nivel mondial. Acest fenomen se datorează mai multor factori, precum: creșterea numărului de utilizatori de smartphone-uri, utilizarea intensivă a aplicațiilor mobile, streamingul video și audio, jocurile online, rețelele sociale, creșterea numărului de dispozitive Internet of Things (IoT), creșterea numărului de persoane care lucrează de la distanță, educația online etc. Pentru a face față cerințelor tot mai mari de date mobile, industria telecomunicațiilor depune eforturi pentru a dezvolta și implementa soluții și pentru a îmbunătăți infrastructura rețelilor mobile. Una dintre aceste soluții se bazează pe tehnologia LiFi (Light Fidelity), care a fost standardizată pentru prima dată pe 4 august 2023 (standardul IEEE 802.15.13).

Concomitent cu aceste fapte, industriile producătoare de bunuri și servicii s-au modernizat continuu în ultimul timp, din necesitate și dorință de a-și crește IQ-ul digital. În prezent, multe procese de fabricație sunt depășite și necesită diverse upgrade-uri pentru a se alinia cerințelor pieței în continuă creștere. Ca parte a acestui proces de reinvenție constantă, producătorii de bunuri și servicii folosesc diverse dispozitive de automatizare care necesită, de multe ori, cabluri lungi pentru a funcționa; acest lucru restricționează autonomia și reconfigurarea rapidă a liniilor de producție. Astăzi, tehnologiile de telecomunicații wireless pentru domenii industriale au îmbunătățit considerabil capacitatea producătorilor de a colecta informații critice, de a analiza aceste informații și de a răspunde la ele. Aceste idei inovatoare reprezintă factorul cheie pentru creșterea productivității, profitabilității și pentru diminuarea dezavantajelor menționate anterior. În prezent, transmisia wireless a datelor industriale se realizează prin tehnici bazate pe frecvențe radio (RF). Acestea sunt incluse în standardul WLAN IEEE 802.11n, pentru transmisii cu o rată de date de până la 600 Mbps, sau standardul 802.11ac pentru transmisii cu o rată de date de până la 1300 Mbps.

În prezent, fabricile moderne ar trebui să adopte următoarele concepte care definesc Industria 4.0: interoperabilitate (fabricile ar trebui să angajeze oameni și să fie echipate cu mașini, dispozitive și senzori interconectați și capabili să comunice între ei); transparența informațiilor, asistență tehnică (sistemele ar trebui să fie capabile să sprijine oamenii în luarea deciziilor și rezolvarea problemelor, precum și în oferirea de asistență pentru sarcini care depășesc capacitățile umane); luarea deciziilor descentralizate (sistemele ar trebui să fie capabile să acționeze autonom și să ia decizii simple pe cont propriu). Principalele provocări cu care se confruntă Industria 4.0 în prezent sunt următoarele: probleme privind siguranța datelor (datorită integrării noilor sisteme și necesității în creștere de accesare a acestora); integritatea procesului de fabricație (acest proces este greu de menținut doar cu o echipă mică de monitorizare umană); probleme tehnice (fiabilitatea și stabilitatea echipamentelor pentru menținerea comunicării sunt greu de realizat); utilizarea frecvențelor radio pentru comunicare (se confruntă cu pericole de latență și probleme care transformă aceste sisteme de comunicare în sisteme nesigure).

În aceste circumstanțe și având în vedere avantajele și performanțele oferite de tehnologia LiFi (rate mari de transfer de date, siguranța datelor, fiabilitate și conectivitate în medii sensibile etc.), se

consideră că implementarea acesteia în mediul industrial va îmbunătăți considerabil capacitatea producătorilor de a colecta informații critice, de a le analiza și de a răspunde rapid la acestea; acest lucru reprezintă factorul cheie pentru creșterea productivității, profitabilității și pentru diminuarea dezavantajelor celorlalte tehnologii utilizate în prezent. În zilele noastre, implementarea tehnologiei LiFi în mediul industrial este în stadiul de pionierat.

Ținând cont de contextul prezentat, principalele obiective ale tezei de doctorat sunt:

- Dezvoltarea echipamentelor utilizatorilor (UE) și a punctelor de acces (AP) folosite în tehnologia LiFi;

- Obținerea modelelor matematice precise ale canalelor de comunicare LiFi (canale de legătură descendentă și ascendentă);

- Dezvoltarea tehnicilor eficiente de codare/decodare și corectare a erorilor în vederea asigurării siguranței suplimentare și recuperării corecte a datelor transmise prin canalele de comunicare LiFi;

- Testarea experimentală a unui sistem de comunicare bazat pe tehnologia LiFi;

- Exemplificarea modului de implementare a tehnologiei LiFi în mediul industrial.

În vederea realizării obiectivelor prezentate, teza de doctorat este structurată în cinci capitole, șapte anexe și o bibliografie, strâns corelate cu subiectul abordat.

În consecință, primul capitol prezintă o scurtă istorie a tehnologiei LiFi, precum și principalele noțiuni referitoare la: structura unui sistem de comunicație LiFi, rețelele LiFi și managementul interferențelor. Rolul acestui capitol este de a înțelege mai bine tehnologia LiFi, de a afla stadiul actual al cercetărilor și de a identifica corect căile de cercetare în vederea atingerii obiectivelor necesare.

Ținând cont de importanța electronicii de putere pentru tehnologia LiFi, pentru a obține dispozitive de iluminat mai eficiente care sunt folosite și ca puncte de acces (AP), al doilea capitol analizează, prin simulare numerică în Matlab-Simulink, precum și experimental, principalele convertoare DC-DC, care sunt utilizate ca drivere pentru LED-uri în AP-uri: convertorul DC-DC buck, convertorul DC-DC boost și convertorul buck-boost DC-DC. Pe de altă parte, la sfârșitul acestui capitol, analizez, prin simulare numerică în Matlab-Simulink, convertoarele rezonante DC-DC.

În al treilea capitol prezint trei noi topologii de convertoare DC-DC, care nu includ condensatori electrolitici mari. Acestea sunt proiectate minuțios astfel încât fluctuațiile tensiunii de ieșire, precum și ondulațiile curentului de ieșire să nu afecteze calitatea iluminatului și a datelor transmise, iar protecția LED-urilor să fie optimă. Convertoarele DC-DC prezentate în acest capitol sunt analizate prin simulare în LTSpice. Aceste topologii permit reducerea dimensiunii punctelor de acces (AP) și a echipamentelor utilizatorilor (UE) folosite de tehnologia LiFi, cu eficiență energetică și fiabilitate mai mari decât cele ale convertoarelor DC-DC clasice, care includ condensatori electrolitici mari (convertoare studiate în capitolul al doilea). În plus, absența condensatorilor electrolitici mari în AP-uri și UE-uri permite reducerea costurilor și a zgomotului electromagnetic.

În capitolul al patrulea prezint cele mai relevante cercetări și rezultate în domeniul modelării matematice a canalelor de comunicare LiFi, presupunând că atât AP-ul, cât și UE-urile sunt fixe. Importanța acestui capitol constă în faptul că cele mai precise modele matematice ale canalelor de comunicare LiFi permit realizarea proiectării, precum și testarea cea mai exactă a sistemelor de comunicare LiFi. Modelele matematice ale canalelor de comunicare LiFi sunt clasificate în capitolul al patrulea în două mari categorii: modele matematice neparametrice și modele matematice parametrice. Printre cele mai importante modele matematice prezentate în acest capitol se numără următoarele:

- Modelul matematic neparametric bazat atât pe geometria camerei, cât și pe reflexiile difuze ale obiectelor și pereților din cameră. Relațiile care definesc acest model matematic permit calcularea răspunsului impulsului canalelor de comunicație LOS și NLOS într-un sistem de comunicație LiFi. În plus, prezint în detaliu programul de simulare în Matlab, care asigură determinarea răspunsului impulsului canalelor de comunicație LOS și NLOS, precum și evidențierea SNR-ului, în decibeli, în funcție de distanța dintre AP și UE;

- Modelul parametric al canalului de comunicație LiFi bazat pe rețele neuronale FLANN (Functional Link Artificial Neural Networks), care utilizează funcția ortogonală Laguerre și funcția Laguerre generalizată. În vederea obținerii datelor de intrare/ieșire folosite pentru antrenarea rețelei neuronale FLANN, am realizat un experiment cu o foto rezistență și un convertor buck DC-DC, fără un condensator electrolitic mare. În consecință, semnalul de intrare este considerat a fi curentul prin bobina convertorului buck DC-DC, în timp ce semnalul de ieșire este definit de tensiunea pe foto rezistență. Pe de altă parte, prezint în detaliu programul Matlab care permite antrenarea rețelei FLANN în vederea obținerii modelului matematic al canalului de comunicare LiFi.

În plus, pe baza studiului realizat în acest capitol și coroborat cu alte cercetări efectuate până în prezent, evidențiez două căi de cercetare foarte importante care nu au fost încă suficient abordate și care privesc modelarea matematică a canalelor de comunicare LiFi.

În capitolul al cincilea prezint două metode de detectare și corectare a erorilor datelor primite pe canalele de comunicare LiFi, afectate de zgomot (codul Hadamard îmbunătățit și codul Hadamard 3D). Ambele metode de detectare și corectare a erorilor datelor transmise sunt prezentate pe larg și sunt implementate în programul Matlab. Pe baza acestor programe Matlab, utilizatorii pot codifica/decodifica, precum și detecta și corecta erorile datelor primite, bazându-se pe codul Hadamard îmbunătățit și codul Hadamard 3D. Între timp, pentru a evidenția utilitatea și performanța codului Hadamard îmbunătățit și a codului Hadamard 3D în detectarea și corectarea erorilor datelor primite pe un canal de comunicație LiFi, proiectez, de asemenea, în acest capitol, un sistem de comunicație LiFi între un punct de acces (AP) și un echipament al utilizatorului (UE), cu două calculatoare și două hotspoturi LiFi (IPMS 1GHS), fabricate de Institutul Fraunhofer pentru Sisteme Fotonice Microsisteme (IPMS) din Germania. Partea finală a acestui capitol prezintă două aplicații practice ale tehnologiei LiFi în mediul industrial. Ambele aplicații includ PLC-ul FX3U, fabricat de Mitsubishi, precum și hotspoturi

LiFi (IPMS 1GHS). Prima aplicație prezintă modulul de control al unei serii de electrovalve folosind tehnologia LiFi și RS485; a doua aplicație prezintă un sistem de monitorizare a presiunilor și temperaturilor unei serii de schimbătoare de căldură, unde interfața între panoul de automatizare și computer (unde sunt salvate datele achiziționate) are loc prin tehnologia LiFi. În acest scop, folosesc două hotspoturi LiFi (IPMS 1GHS), fabricate de IPMS. Pe de altă parte, ca parte a primei aplicații, propun un nou concept pentru descentralizarea panoului de automatizare, folosind echipamente de utilizator (UE) bazate pe tehnologia LiFi, care permit funcții variate, cum ar fi: achiziția de date de la diverși transmițători, UE-uri cu 4/6/8 intrări/ieșiri analogice, UE-uri cu 4/6/8 intrări/ieșiri digitale etc.

La finalul tezei de doctorat, prezint principalele concluzii și contribuțiile personale la tehnologia LiFi, precum și o serie de propuneri de cercetare care ar putea fi abordate în viitor.

Toate capitolele și bibliografia, precum și cele șapte anexe de la finalul tezei de doctorat reprezintă un suport teoretic și practic solid pentru proiectanții și cercetătorii în domeniul tehnologiei LiFi.

A. Concluzii finale

Concluziile finale ale tezei de doctorat se bazează pe concluziile evidențiate în fiecare capitol.

Astfel, din Capitolul 1 rezultă următoarele concluzii:

- Tehnologia LiFi (Light Fidelity) a apărut din necesitatea de a suplimenta spectrul radio utilizat în comunicațiile wireless, care în ultima perioadă a fost extrem de aglomerat din cauza traficului foarte mare de date mobile;
- Termenul LiFi a fost folosit pentru prima dată în august 2011 de profesorul Harald Haas, într-un discurs la TEDGlobal Conference, în Edinburgh, Scoția;
- Tehnologia LiFi a fost standardizată pe 4 august 2023 de IEEE (standardul IEEE 802.15.13), fiind o extensie a tehnologiei VLC (Visible Light Communication);
- LiFi este o tehnologie de comunicații optice wireless (OWC - Optical Wireless Communication), unde transmisia de date se face pe distanțe scurte, bazându-se pe undele electromagnetice din spectrul vizibil, ultraviolet și infraroșu;
- Resursele spectrale ale tehnologiei LiFi sunt de aproximativ 10.000 de ori mai mari decât cele ale tehnologiilor bazate pe frecvențe radio;
- Punctul de acces LiFi (AP) este un dispozitiv electronic care permite conectarea unuia sau mai multor echipamente de utilizator (UE);
- Principiul LiFi se bazează pe codificarea și transmiterea datelor prin modularea amplitudinii surselor de lumină, conform unui protocol bine definit și standardizat;
- Comunicația între dispozitivele dintr-o rețea LiFi (comunicația între punctele de acces și echipamentele utilizatorilor) se face bidirecțional (half-duplex/full-duplex), în mod multi-

user (point-to-point, multipoint-to-point, point-to-multipoint, multipoint-to-multipoint). De regulă, pentru downlink, LiFi folosește undele electromagnetice din spectrul vizibil, în timp ce pentru uplink folosește undele electromagnetice din spectrul infraroșu și/sau ultraviolet (pentru a elimina interferențele între downlink și uplink și pentru a nu deranja atenția utilizatorilor mobili în timpul transmisiei uplink). În ceea ce privește tehnologia VLC, comunicația între două dispozitive poate avea loc unidirecțional (simplex) sau bidirecțional (half-duplex/full-duplex), folosind, de regulă, modul de comunicație point-to-point, unde atât downlink-ul, cât și uplink-ul folosesc doar spectrul vizibil;

- Structura unui punct de acces LiFi (AP) include următoarele blocuri asociate transmisiei de date: unul sau mai multe LED-uri al căror rol este de a ilumina camera și de a transmite datele prin downlink; un bloc de codificare prin care o secvență de simboluri primește o anumită semnificație, cu o serie de reguli semantice (prin această operație, putem detecta și corecta eventualele erori în datele primite și decodificate) și un modulator (al cărui scop este de a adapta semnalul/mesajul la caracteristicile canalului, de a multiplexa semnalele, de a transmite semnalele eficient și de a minimiza efectele perturbatoare de-a lungul canalului LiFi). Blocul de codificare include două subseturi: blocul de codificare a sursei ~ care transpune mesajul în alfabetul sursei și blocul de codificare a canalului ~ care transpune mesajul în alfabetul canalului de comunicație. Codificatorul sursei convertește secvența de simboluri într-o secvență de valori binare (0 sau 1), în timp ce codificatorul canalului grupează aceste simboluri binare în cuvinte. Pe de altă parte, blocurile asociate recepției datelor într-un AP sunt următoarele: un fotodetector (care convertește lumina în curent electric), un amplificator cu transimpedanță (al cărui rol este de a converti curentul de la ieșirea fotodetectorului în tensiune), un filtru de lumină ambientală (folosit în circuitul de feedback al amplificatorului cu transimpedanță (TIA), al cărui rol este de a diminua curentul continuu de la ieșirea fotodetectorului determinat de alte corpuri de iluminat din cameră), un filtru anti-aliasing (care filtrează tensiunea de la ieșirea TIA și o adaptează la un anumit domeniu permis de circuitul de demodulare), un bloc de demodulare (care extrage semnalul original din semnalul modulat primit și, de asemenea, efectuează funcția de demultiplexare, atunci când este necesar) și un bloc de decodare (care îndeplinește aceleași funcții ca blocul de codificare, dar invers). În plus, acest bloc memorează un anumit număr de cuvinte/mesaje și efectuează și sincronizarea. Pe lângă blocurile menționate anterior, structura unui AP poate include și următoarele blocuri: convertoare analog-digitale (ADC), convertoare digital-analogice (DAC), circuite de ceas și temporizare și blocuri de egalizare/adaptare. De regulă, alimentarea unui AP se face printr-o sursă externă de tensiune continuă.
- Structura echipamentului utilizatorului (UE) este, de obicei, identică cu cea a punctelor de acces (AP), cu diferența că un UE include o fotodiodă (care acționează ca fotodetector prin

recepția downlink) și LED-uri infraroșii (folosite pentru transmisia datelor în spectrul infraroșu către AP-uri prin uplink). Alimentarea UE-ului se face printr-o baterie/accumulator pentru a permite mobilitatea completă a utilizatorilor;

- Mai multe puncte de acces (AP) pot fi incluse în rețelele LiFi, care pot fi conectate conform diferitelor topologii de rețea. Conexiunile backhaul ale punctelor de acces au loc, de regulă, prin fibră optică; totuși, pot fi folosite și alte conexiuni, cum ar fi PoE (Power over Ethernet), EoP (Ethernet over Powerlines) etc.;
- Conectarea rețelelor LiFi cu alte rețele de comunicații se face printr-un gateway de rețea. Rețelele LiFi pot fi folosite în tandem cu rețelele de comunicații wireless în frecvențe radio (WiFi, Bluetooth, ZigBee etc.);
- Comunicația MultiCast poate fi realizată în rețelele LiFi (când expeditorul comunică cu o parte din dispozitivele rețelei – nu cu toate), precum și comunicația BroadCast (când un expeditor din rețea comunică cu toate celelalte dispozitive din rețea);
- Rețelele LiFi, precum și rețelele hibride RF/VLC, reprezintă astăzi o soluție viabilă pentru criza spectrului. Această criză constă în lipsa unui spectru wireless suficient de larg pentru a furniza comunicații în majoritatea dispozitivelor wireless;
- De regulă, prin uplink, dispozitivele mobile (UE-urile) transmit informații de feedback către AP-uri (confirmarea recepției datelor comunicate prin downlink, informații despre starea canalului de comunicație (CSI), încărcarea fișierelor etc.);
- Cele mai utilizate tehnici de handover în rețelele complete LiFi sunt următoarele: handover orizontal (HHO) și handover vertical (VHO);
- În cazul HHO, utilizatorul schimbă un punct de acces cu un alt punct de acces care folosește aceeași tehnologie de rețea;
- În cazul VHO, un utilizator schimbă un punct de acces cu o anumită tehnologie de rețea (de exemplu, un AP cu tehnologie LiFi) cu un alt punct de acces care folosește o tehnologie de rețea diferită (de exemplu, un AP cu tehnologie RF/VLC);
- În rețelele LiFi pot fi întâlnite atât tehnicile care permit handover-ul între AP-uri adiacente (vecine), cât și tehnicile care permit handover-ul între AP-uri neadiacente (handover skipping);
- În prezent, algoritmi decizionali care permit alegerea între HHO sau VHO, la un anumit moment, iau în considerare unul sau mai mulți parametri care privesc: viteza UE-ului, starea canalului de comunicație (CSI), rata de date, informațiile statistice privind blocarea canalului de comunicație etc.;
- Pentru a obține rețele LiFi robuste, algoritmi decizionali utilizați în tehnicile de handover ar trebui să ofere obținerea unor răspunsuri rapide, astfel încât datele transmise să nu fie afectate. Acești algoritmi decizionali ar trebui să țină cont de calitatea canalului de

comunicație, de resursele disponibile, precum și de timpul conform căruia un anumit UE este menținut conectat cu un anumit AP (CDT - Cell Dwell Time);

- Pentru a obține rețele LiFi eterogene (rețele HetNet), arhitectura centrată pe celule a fost preferată în ultima vreme (acest lucru se datorează razei mici de acoperire a unui AP);
- Într-o rețea LiFi centrată pe celule, controlul mobilității UE-urilor (în cadrul acoperirii unui anumit AP), procesarea semnalului, gestionarea resurselor, furnizarea serviciilor etc. sunt asigurate de punctul de acces asociat (AP);
- Cele mai utilizate arhitecturi pentru poziționarea bidimensională a AP-urilor LiFi sunt următoarele: arhitectura hexagonală, arhitectura bară pătrată, arhitectura bazată pe procesul de punct Poisson omogen și arhitectura procesului de punct Hardcore;
- Pentru a evita interferențele dintre celulele adiacente (CCI - Co-Channel Interference), precum și pentru a minimiza consumul de energie electrică, în cazul în care nu există niciun UE în zona de acoperire a unui punct de acces, acesta este dezactivat (funcțiile de comunicație ale AP-ului asociat sunt dezactivate). În acest caz, AP-ul este folosit doar pentru iluminarea camerei;
- Interferențele CCI pot fi, de asemenea, atenuate printr-o serie de algoritmi de gestionare a resurselor care sunt transmiși UE-urilor într-o rețea LiFi. Resursele asociate acestor metode sunt împărțite în blocuri care privesc domeniul de timp, frecvență, lungime de undă, putere etc. Împărțirea acestor resurse poate fi statică sau dinamică;
- O altă metodă de reducere a interferențelor CCI se bazează pe diversitatea unghiulară a AP-urilor și/sau UE-urilor în rețelele LiFi (ADT - Angle Diversity Transmitter). Această metodă de reducere a interferențelor este specifică tehnologiei LiFi, nefiind împrumutată din tehnologiile celulare pe frecvențe radio;
- Rețelele LiFi care conțin AP-uri și UE-uri cu diversitate unghiulară sunt mai performante decât rețelele LiFi care conțin AP-uri și UE-uri cu un singur element (interferențele CCI sunt semnificativ diminuate; AP-urile și UE-urile prezintă o eficiență spectrală mai bună; sistemul de comunicație nu este semnificativ influențat de poziționarea spațială a UE-urilor mobile etc.);
- Cele mai importante avantaje ale tehnologiei LiFi sunt următoarele: viteză foarte mare de transmisie a datelor (în prezent, viteza atinsă este de 224 Gbits/s, în condiții de laborator); fără interferențe radio; siguranță (spre deosebire de WiFi, lumina nu trece prin pereți, ceea ce asigură o mai bună siguranță a rețelelor LiFi); lățime de bandă (resursele spectrale ale tehnologiei LiFi sunt de aproximativ 10.000 de ori mai mari decât cele ale tehnologiei WiFi); utilizare în medii sensibile (spitale, centrale nucleare, unități miniere subterane, avioane etc.); costuri de exploatare mai mici decât tehnologia WiFi;

- Principalele dezavantaje ale tehnologiei LiFi sunt următoarele: rază limitată (un AP poate acoperi o cameră, cel mult); necesitatea unei surse de lumină pentru funcționare (aceasta limitează utilizarea tehnologiei LiFi în camerele care nu necesită lumină sau unde lumina trebuie redusă); costuri inițiale ridicate (implementarea tehnologiei LiFi necesită investiții inițiale mari; de exemplu, două hotspoturi LiFi, IPMS 1GHS, fabricate de IPMS, Germania, costau 3.600 de euro în 2022); interferențe produse de alte surse de lumină (lumina naturală, precum și lumina provenită de la alte surse de lumină pot interfera cu semnalul LiFi, afectând astfel fiabilitatea și performanța); probleme de compatibilitate (fiind o tehnologie relativ nouă, nu este compatibilă cu o serie de dispozitive și echipamente existente).

Pe baza studiilor experimentale, precum și a simulărilor numerice în Matlab-Simulink realizate în Capitolul 2, pot evidenția următoarele concluzii:

- În tehnologia LiFi, emițătorul dintr-un AP ar trebui să îndeplinească două funcții: funcția de iluminare a camerei și funcția de comunicație de date;
- În prezent, proiectarea circuitelor de control ale LED-urilor de înaltă luminozitate (driver pentru LED-uri) se confruntă cu următoarele provocări: capacitatea de a implementa modularea, eficiența driverului și asigurarea ratei de biți necesare pentru comunicație. Modulația intensității luminii emise de LED ar trebui realizată astfel încât funcția de iluminare a camerei să nu fie afectată. În acest sens, controlul curentului prin LED ar trebui să fie eficient și performant. În consecință, pentru a nu afecta iluminarea, curentul modulat ar trebui să fie conform unui anumit nivel de polarizare DC;
- Driverii pentru LED-uri asociate convertoarelor DC-DC cu un răspuns rapid la ieșire sunt capabile să schimbe tensiunea de ieșire la rate de ordinul MHz. Aceste convertoare generează, la ieșire, atât curentul de polarizare asociat LED-ului, cât și curentul asociat informației care urmează să fie transmisă;
- Principalele convertoare DC-DC care sunt utilizate ca drivere pentru LED-uri în AP-uri sunt următoarele: convertoare DC-DC buck, convertoare DC-DC boost și convertoare DC-DC buck-boost;
- Convertoarele buck, boost, buck-boost DC-DC sunt capabile să ofere modulații digitale (ASK, PSK, QAM etc.);
- Convertoarele DC-DC se comportă ca amplificatoare de putere radiofrecvență (RFPA), unde tensiunea de alimentare aplicată amplificatorului de putere (RF) este reglată continuu astfel încât amplificatorul să funcționeze cu eficiență maximă (tehnica ET - Envelope Tracking; tehnica EER - Envelope Elimination/Restoration);
- Principala problemă a convertoarelor buck, boost, buck-boost DC-DC utilizate ca drivere pentru LED-uri privește performanța dinamică în regimul tranzitoriu al răspunsului de ieșire

al convertorului DC-DC. Supratensiunea este mare la frecvențe de comutare de ordinul zecilor de MHz. De regulă, pentru a diminua acest dezavantaj, sunt utilizate filtre de ordin superior la ieșirea convertoarelor DC-DC (aceste filtre folosesc condensatori electrolitici mari). Filtrul de ieșire ar trebui să se comporte ca un filtru trece-bandă care elimină frecvența de comutare. Proiectarea filtrului ar trebui realizată astfel încât frecvența sa de tăiere să fie suficient de mare pentru a putea anula componentele superioare ale armonicilor de comutare. În plus, frecvențele de comutare ale tranzistorilor incluși în convertorul DC-DC ar trebui să se situeze în limite rezonabile, astfel încât eficiența convertorului să nu fie afectată;

- O altă strategie pentru creșterea performanței în regim tranzitoriu a driverelor pentru LED-uri se bazează pe utilizarea arhitecturilor hibride, unde, pe lângă convertorul DC-DC cu răspuns rapid, este utilizat și un controler liniar. În prezent, există cercetări care evidențiază faptul că, în anumite cazuri, arhitectura hibridă paralelă este mai eficientă decât arhitectura hibridă serie;
- Testele experimentale au arătat că frecvența de comutare influențează eficiența și performanța termică a convertoarelor DC-DC analizate (buck, boost și buck-boost), precum și caracteristica curent-tensiune a LED-ului (din cauza temperaturii). Cu cât frecvența de comutare este mai mare, cu atât eficiența convertorului DC-DC este mai mare. Totuși, o frecvență de comutare prea mare poate determina pierderi de comutare, precum și încălzirea excesivă a componentelor convertorului DC-DC și a LED-ului. În consecință, pot afirma că curentul și tensiunea de ieșire ale convertoarelor DC-DC studiate se schimbă în funcție de frecvența de comutare a tranzistorului. În cazul convertoarelor buck și boost, tensiunea de ieșire nu se schimbă, în timp ce curentul de ieșire crește odată cu creșterea frecvenței de comutare. În plus, în cazul convertorului buck-boost, atât tensiunea de ieșire, cât și curentul de ieșire cresc odată cu creșterea frecvenței de comutare. Aceste efecte permit obținerea unor luminozități variate ale LED-ului. În consecință, atunci când frecvența de comutare a tranzistorului în convertorul DC-DC utilizat crește, luminozitatea LED-ului crește;
- De asemenea, testele experimentale arată că, în cazul în care frecvența de comutare a tranzistorului în convertorul DC-DC crește, tensiunea de ieșire este mult mai stabilă, prezentând ondulații mai mici. Pe de altă parte, creșterea frecvenței de comutare a tranzistorului în convertorul DC-DC permite obținerea unei ondulații mult mai mici a curentului de ieșire;
- O altă posibilitate de obținere a driverelor pentru LED-uri se bazează pe utilizarea convertoarelor rezonante DC-DC (un convertor rezonant include un inverter, un filtru trece-bandă și un redresor). Principalele avantaje ale convertoarelor rezonante DC-DC privesc pierderile de comutare reduse, precum și energia scăzută necesară pentru controlul tranzistorilor. În plus, utilizarea comutării moi în convertoarele DC-DC (SSC - Soft-

Switching Converters) reduce zgomotul în sistem și interferențele electromagnetice sunt mai mici. Pentru obținerea unei forme de undă dorite pe LED, blocul de redresare este construit în jurul unui redresor dublu alternanței cu diode, la ieșirea căruia este atașat un filtru trece-jos (un filtru RC);

- Pentru a obține un transfer maxim de putere, convertoarele DC-DC ar trebui să funcționeze la o frecvență de comutare apropiată de frecvența de rezonanță a filtrului trece-bandă. Filtrul trece-bandă este proiectat în jurul unui circuit rezonant LC (serie, paralel sau mixt);
- Un alt avantaj al convertoarelor SSC privesc posibilitatea de a utiliza un nucleu feritic mic (convertor), atașat la ieșirea filtrului trece-bandă, care permite funcționarea acestuia într-un interval mai larg de tensiuni de intrare continue. Acest fapt conferă convertoarelor SSC o eficiență mai bună în comparație cu convertoarele clasice (buck, boost și buck-boost);
- Deși, în convertoarele rezonante DC-DC, controlul curentului și tensiunii este mai dificil decât în cazul convertoarelor DC-DC clasice, printr-o planificare precisă a circuitului de control și o proiectare adecvată, ele pot fi utilizate pentru modularea amplitudinii surselor de lumină, cu beneficii semnificative pentru tehnologia LiFi;
- În plus, cercetările actuale arată că utilizarea convertoarelor DC-DC cu mai multe faze (convertori multi-fază) în comunicațiile LiFi permite creșterea ratei de biți, precum și implementarea mai bună a modulațiilor digitale. Principalul dezavantaj este că eficiența convertoarelor multi-fază este mai mică decât eficiența convertoarelor clasice.

Capitolul 3 prezintă următoarele concluzii:

- Convertoarele DC-DC care nu includ condensatori electrolitici mari permit reducerea dimensiunii punctelor de acces (AP) și a echipamentelor utilizatorilor (UE) în tehnologia LiFi; ele prezintă o eficiență energetică și fiabilitate mai mari decât convertoarele DC-DC clasice (care includ condensatori electrolitici mari);
- Absența condensatorilor electrolitici mari din AP-uri și UE-uri permite reducerea costurilor (convertoarele DC-DC sunt mai ieftine) și a zgomotului electromagnetic (condensatorii pot determina zgomot electromagnetic);
- În regimul tranzitoriu de pornire al convertoarelor DC-DC fără condensatori electrolitici mari, curentul prin bobine nu prezintă supratensiune, în cazul în care alimentarea convertoarelor provine dintr-o sursă de tensiune stabilă;
- Sistemele de control ale convertoarelor DC-DC care nu includ condensatori electrolitici mari sunt simple și robuste în toate cazurile de funcționare, atunci când sunt utilizate controlere neliniare cu histerezis;
- În cazul convertoarelor DC-DC care nu includ condensatori electrolitici mari, efectul de reglare a intensității luminii poate fi controlat cu ușurință;

- Prin utilizarea diferitelor LED-uri (care radiază lumină roșie, verde și albastră) în sarcina convertoarelor DC-DC care nu includ condensatori electrolitici mari, crominanta poate fi controlată ușor, iar datele pot fi transmise pe trei canale diferite către sistemul de recepție. Crominanta poate fi ajustată prin schimbarea timpului de aprindere al rândurilor de LED-uri (rânduri de LED-uri albastre, roșii și verzi);
- În cazul în care LED-urile din sarcina convertorului DC-DC fără condensator electrolitic mare sunt conectate prin fire care prezintă o anumită inductanță parazită, un snubber este plasat în paralel cu fiecare tranzistor pentru a elimina supratensiunea apărută pe tranzistorul/tranzistorii incluși în convertor;
- Când sursa de tensiune este conectată la intrarea convertorului DC-DC care nu include un condensator electrolitic mare prin fire care prezintă o anumită inductanță parazită, un condensator mic este instalat la ieșirea sursei de tensiune pentru a elimina supratensiunea pe tranzistorul principal;
- Convertoarele DC-DC fără condensator electrolitic pot fi ușor extinse pentru sisteme multi-fază.

Din Capitolul 4 pot fi stabilite următoarele concluzii:

- Cele mai adecvate modele matematice ale canalelor de comunicație LiFi permit analiza, testarea și proiectarea performantă a sistemelor de comunicație LiFi;
- Modelele matematice ale canalelor de comunicație LiFi pot fi clasificate în două mari categorii: modele matematice neparametrice și modele matematice parametrice;
- Cele mai utilizate strategii pentru obținerea modelelor matematice neparametrice ale canalelor de comunicație LiFi sunt următoarele: determinarea experimentală a răspunsului canalului de comunicație la o intrare impuls; identificarea canalului de comunicație folosind semnale sinusoidale de probă (folosind analiza frecvenței); identificarea canalului de comunicație folosind analiza corelației; identificarea canalului de comunicație folosind analiza spectrală și determinarea analitică a răspunsului canalului de comunicație LOS și NLOS, considerând geometria camerei și reflexiile difuze ale obiectelor și pereților din cameră;
- Cele mai utilizate strategii pentru obținerea modelelor matematice parametrice ale canalelor de comunicație LiFi sunt următoarele: obținerea răspunsului impuls al canalului de comunicație bazat pe metoda Monte Carlo/metoda Monte Carlo ajustată (bazată pe monitorizarea fasciculelor transmise aleatoriu de un anumit AP; parametrii determinați sunt următorii: numărul de fascicule recepționate de un anumit UE, puterea optică a fiecărui fascicul recepționat, precum și timpul de propagare al fiecărui fascicul); identificarea polinomială (bazată pe modele ARX, OE etc., unde parametrii pot fi determinați printr-un

algoritm off-line sau on-line) și identificarea bazată pe rețele neuronale (rețele neuronale MLP - Multilayer Perceptrons, rețele neuronale FLANN - Functional Link Artificial Neural Networks etc.);

- În vederea determinării răspunsului impuls al canalului de comunicație LiFi, pot fi utilizate și programe de simulare specializate, care permit descrierea precisă a interacțiunii fasciculelor într-o cameră de o anumită dimensiune. Aceste programe sunt capabile să calculeze puterea și durata de propagare pentru fiecare fascicul transmis de AP, considerând caracteristicile de reflexie ale obiectelor/suprafețelor din cameră.

Pe baza analizei din Capitolul 5, pot fi stabilite următoarele concluzii:

- Prin utilizarea codului Hadamard îmbunătățit/3D Hadamard pentru detectarea și corectarea erorilor, necesitatea retransmiterii datelor scade, economisindu-se astfel atât lățimea de bandă a canalului, cât și resursele sistemului de comunicație LiFi. În plus, atunci când sunt utilizate aceste coduri de detectare și corectare a erorilor, fiabilitatea comunicației este îmbunătățită (sistemul de comunicație LiFi oferă o calitate ridicată a serviciilor chiar și în condiții de zgomot crescut, permițând utilizarea sa pentru transmisiile speciale care privesc aplicații critice, cum ar fi: comunicații de urgență, transmisiile în timp real etc.);
- Testele experimentale arată că algoritmul de detectare și corectare a erorilor, bazat pe codul Hadamard îmbunătățit, corectează complet cuvintele de cod incorecte, cu o certitudine de 100%, în cazul în care AP-ul și UE-ul sunt fixe și perfect aliniat (există un canal LOS între ele) și sunt situate la o distanță cuprinsă între 30 [cm] și 440 [cm]. În testele experimentale, atât UE-ul, cât și AP-ul includ un hotspot LiFi IPMS 1GHS fabricat de Institutul Fraunhofer pentru Sisteme Fotonice Microsisteme (IPMS), din Germania;
- Implementarea tehnologiei LiFi în mediul industrial poate îmbunătăți capacitatea producătorilor de a colecta informații critice în timp real, de a analiza aceste informații și de a răspunde la ele, ceea ce reprezintă factorul cheie care contribuie la creșterea productivității, profitabilității și la diminuarea dezavantajelor prezentate de celelalte tehnologii utilizate în prezent;
- Utilizarea, în mediul industrial, a unei serii de module de intrare/ieșire bazate pe tehnologia LiFi (UE-uri care pot avea 4/6/8 intrări/ieșiri analogice, 4/6/8 intrări/ieșiri digitale etc.) permite amplasarea acestor module în apropierea procesului automatizat, determinând creșterea flexibilității, a eficienței energetice (lungimile cablurilor și pierderile de putere sunt reduse) și a fiabilității întregului sistem de automatizare. În consecință, AP-urile se bazează și ele pe tehnologia LiFi, dar conexiunile dintre ele pot folosi diverse topologii de rețea, unde comunicația între AP-uri are loc prin intermediul protocoalelor ModBus, ProfiBus, FieldBus, Ethernet etc.;

- Utilizarea tehnologiei LiFi în mediul industrial poate descentraliza panourile de automatizare, determinând o reducere a costurilor inițiale și de întreținere, precum și o creștere a flexibilității și fiabilității acestui mediu;
- Utilizarea tehnologiei LiFi pentru monitorizarea descentralizată a parametrilor proceselor industriale permite monitorizarea în timp real a parametrilor (presiuni, temperaturi etc.), siguranța datelor, digitalizarea producției și creșterea IQ-ului digital al producătorilor de bunuri și servicii, în contextul Industriei 4.0.

B. Contribuții

Contribuțiile principale ale tezei de doctorat sunt următoarele:

1. Analiza, prin simulare numerică în Matlab-Simulink, precum și prin simulare experimentală, a principalelor convertoare DC-DC (buck, boost și buck-boost) utilizate ca drivere pentru LED-uri în punctele de acces (AP) și echipamentele utilizatorilor (UE) asociate tehnologiei LiFi;
2. Analiza, prin simulare numerică în Matlab-Simulink, a convertoarelor rezonante serie DC-DC, utilizate ca drivere pentru LED-uri;
3. Prezentarea și analiza, prin simulare în LTSpice, a trei noi topologii de convertoare DC-DC care nu includ condensatori electrolitici mari, utilizate pentru AP-urile și UE-urile asociate tehnologiei LiFi;
4. Prezentarea celor mai relevante cercetări și rezultate obținute în domeniul modelării matematice a canalelor de comunicație LiFi, presupunând că atât AP-ul, cât și UE-ul sunt fixe;
5. Programul de simulare Matlab permite atât identificarea răspunsului impuls al canalelor de comunicație LOS și NLOS, cât și a SNR-ului, în decibeli, în funcție de distanța dintre AP și UE. Programul de simulare se bazează pe modelul matematic neparametric, bazat atât pe geometria camerei, cât și pe reflexiile difuze ale obiectelor și pereților din cameră;
6. Analiza experimentală a convertorului DC-DC buck care nu include condensatori electrolitici mari, utilizat ca driver pentru LED-uri;
7. Obținerea experimentală a modelului matematic parametric al canalului de comunicație LiFi, bazat pe rețele neuronale FLANN (Functional Link Artificial Neural Networks), care utilizează funcția Laguerre ortogonală/generalizată, parametrii rețelei neuronale fiind determinați pe baza unui algoritm off-line;
8. Prezentarea și analiza, prin simulare în Matlab, a algoritmilor de codificare/decodificare, a algoritmilor de detectare și corectare a erorilor și a algoritmilor Hadamard îmbunătățiți și 3D Hadamard;

9. Testarea experimentală a algoritmului Hadamard îmbunătățit într-un sistem de comunicație LiFi, unde atât AP-ul, cât și UE-ul includ un calculator și un hotspot LiFi (IPMS 1GHS), fabricat de Institutul Fraunhofer pentru Microsisteme Fonică (IPMS), din Germania;
10. Prezentarea a două aplicații industriale care utilizează tehnologia LiFi. Prima aplicație prezintă modulul de control al unei serii de electrovalve folosind tehnologia LiFi și RS485; a doua aplicație prezintă un sistem de monitorizare a presiunilor și temperaturilor unei serii de schimbătoare de căldură, unde interfața dintre panoul de automatizare și calculatorul în care sunt salvate datele achiziționate se realizează prin tehnologia LiFi. În plus, ca parte a primei aplicații, este prezentat un nou concept privind automatizarea descentralizată bazată pe module de intrare/ieșire asociate tehnologiei LiFi.

C. Propuneri

Principalele propuneri și direcții de cercetare care ar putea fi abordate în viitor sunt următoarele:

- Dezvoltarea tehnicilor de distribuire a resurselor rețelelor LiFi. În prezent, această direcție de cercetare este încă la început. De exemplu, tehnicile NOMA pentru uplink sunt în stadiul de pionierat (majoritatea cercetărilor se concentrează pe downlink). În plus, performanța rețelelor LiFi, unde distribuirea resurselor se face prin tehnici NOMA, necesită cercetări suplimentare (în special în cazul rețelelor cu mai multe UE-uri);
- Proiectarea driverelor LED performante și eficiente, capabile să ofere: modulații complexe ale semnalelor (modulații multi-carrier); un compromis optim între funcțiile de iluminare și comunicație (în cazul AP-urilor); o rată de biți ridicată etc. În consecință, pot fi dezvoltate noi tipuri de convertoare DC-DC multi-fază fără condensatori electrolitici mari;
- Modelarea matematică a canalelor de downlink și uplink în sistemele LiFi, care reprezintă o altă direcție de cercetare ce ar putea fi dezvoltată. Un potențial de cercetare uriaș este, de asemenea, prezentat de modelarea matematică on-line a canalelor de comunicație LiFi, evidențiind scenariile în care UE este mobil (UE se mișcă și prezintă diferite locații temporale în cadrul rețelelor LiFi) și este orientat aleatoriu către AP-urile din rețeaua LiFi. O propunere în acest sens se bazează pe obținerea modelelor matematice on-line ale canalelor de comunicație downlink și uplink, bazate pe rețele neuronale FLANN, unde parametrii rețelei neuronale sunt determinați printr-o tehnică on-line. În viitor, atunci când se utilizează rețele neuronale FLANN pentru modelarea matematică a canalelor de comunicație LiFi, ar putea fi utilizate și alte tipuri de funcții ortogonale, cum ar fi: Legendre, Cebasev, Hermite etc.;
- Tehnicile de gestionare a handover-ului UE-urilor care se deplasează în cadrul rețelelor LiFi reprezintă o altă direcție de cercetare foarte importantă care ar putea fi dezvoltată în viitor. Alegerea algoritmilor decizionali utilizați în acest scop este o sarcină dificilă, bazându-se pe

un compromis între complexitatea de calcul a algoritmului (timpul de procesare) și performanța obținută (viteza UE-ului, rata de date, calitatea canalului etc.);

- Implementarea „la scară largă” a tehnologiei LiFi în aplicațiile industriale, în contextul Industriei 4.0, reprezintă o altă direcție de cercetare nouă și foarte importantă, care ar trebui investigată atât teoretic, cât și experimental. Principalele propuneri în acest sens privesc implementarea tehnologiei LiFi în sistemele SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), pentru linii de fabricație flexibile, roboți industriali, elemente operaționale, transmițătoare etc.

Ținând cont de progresul din ultimii ani în ceea ce privește viteza de transmisie a datelor și arhitecturile utilizate, tehnologia LiFi devine din ce în ce mai credibilă și promițătoare. Posibilitățile de utilizare a tehnologiei LiFi sunt nenumărate: rețele rutiere, domeniul auto, geolocație, industrie, comunicații subacvatice, medicină etc.